

陈玉朋, 刘思贝, 许茹悦, 等. 基于超声-碱组合技术的污泥趋零排放 AO 工艺运行效果[J]. 净水技术, 2026, 45(4): 117-123.

Chen Y P, Liu S B, Xu R Y, et al. Operation performance of AO process for near-zero sludge discharge based on combined ultrasonic-alkaline technology [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(4): 117-123.

基于超声-碱组合技术的污泥趋零排放 AO 工艺运行效果

陈玉朋^{1,2}, 刘思贝^{1,2}, 许茹悦^{1,2}, 徐文江^{1,2}, 董娜^{1,2}, 李安峰^{1,2}, 孙光溪^{1,2,*}

(1. 北京市生态环境保护科学研究院, 北京 100037; 2. 生态环境部环境保护工业废水污染控制工程技术(北京)中心, 北京 100037)

摘要 【目的】 本文旨在通过超声-碱组合技术破解污泥, 实现缺氧-好氧(AO)工艺的污泥趋零排放, 并考察其在小试规模下的污染物去除效果和出水水质。【方法】 采用超声-碱组合技术(初始 pH 值为 12, 声能密度为 1.6 W/mL, 超声时间为 70 min, 脉冲比为 2:1)破解剩余污泥, 并将其回用于处理实际污水的 AO 系统中。为了降低破解液回用对出水水质的影响和进一步提高总氮(TN)的去除率, 通过延长好氧池水力停留时间(12.0 h 延长至 14.4 h)和适量投加外加碳源[乙酸钠(NaAc), 800 mg/L]的方式, 实现对污泥趋零排放 AO 工艺的优化。【结果】 破解污泥回用导致出水化学需氧量(COD)浓度升高, 影响达标排放, 但对氨氮去除率及浓度无明显影响。污泥释放的有机物可作为碳源, 使得 AO 工艺的 TN 去除率由 49.7% 提高至 62.0%, 降低出水 TN 浓度。对 AO 工艺进行优化后, 出水水质满足《水污染物综合排放标准》(DB11/307—2013) B 级排放标准, 相较于传统 AO 工艺节约 46.7% 外加碳源投加量。还发现, 污泥趋零排放运行一段时间后会致混合液挥发性悬浮固体与混合液悬浮固体浓度比值降低。【结论】 本文证实基于超声-碱组合技术的污泥趋零排放 AO 工艺可以实现污泥碳源资源化利用, 并有效减少污泥排放量, 为推动生化污泥趋零排放、实现污泥减量化与资源化提供了参考依据。

关键词 污泥破解 缺氧-好氧(AO)工艺 污泥趋零排放 碳源回收 隐性生长

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)04-0117-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.04.013

Operation Performance of AO Process for Near-Zero Sludge Discharge Based on Combined Ultrasonic-Alkaline Technology

Chen Yupeng^{1,2}, Liu Sibe^{1,2}, Xu Ruyue^{1,2}, Xu Wenjiang^{1,2}, Dong Na^{1,2}, Li Anfeng^{1,2}, Sun Guangxi^{1,2,*}

(1. Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, Beijing 100037, China;

2. Engineering Technology <Beijing> Center of Industrial Wastewater Pollution Control, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100037, China)

Abstract [Objective] This paper aims to achieve nearly zero sludge discharge during the anoxic-oxic (AO) process operation using ultrasound-alkali pretreatment, and evaluate pollutants removal and effluent quality in a lab-scale system. [Methods] Waste sludge, which disintegrating by ultrasound-alkaline pretreatment (initial pH value was 12, ultrasonic energy density was 1.6 W/mL, reaction time was 70 min, pulse ratio was 2:1), was returned to AO process for treating the actual wastewater. To minimize the effect of disintegrated sludge on effluent quality and improve total nitrogen (TN) removal efficiency, the sludge near-zero discharge AO process was optimized by increasing hydraulic retention time of aerobic tank from 12.0 h to 14.4 h and dosing external carbon sources [sodium acetate (NaAc), 800 mg/L]. [Results] Disintegrated sludge reusing increased chemical oxygen demand (COD) of effluent and was not conducive to meeting discharge standards, but didn't significantly impact the removal efficiency and concentration of ammonia nitrogen. The organics released from disintegrated sludge could be used as a carbon source, increasing the TN removal efficiency of the AO process from 49.7% to 62.0% and decreasing effluent TN concentration. After AO process optimization, the

[收稿日期] 2024-11-21

[基金项目] 北京市生态环境保护科学研究院基金项目(Y2023-007)

[作者简介] 陈玉朋(1992—),男,工程师,主要从事水污染控制与资源化技术研发等工作,E-mail:chenyupeng@163.com。

[通信作者] 孙光溪(1990—),男,助理研究员,研究方向为水污染控制与资源化技术研发,E-mail:sunguangxi@cee.cn。

effluent quality met the discharge standard of the *Integrated Discharge Standard of Water Pollutants* (DB11/ 307—2013) class B. Meanwhile, the external carbon source dosage was saved 46.7% which was compared to the traditional AO process. In addition, this paper found that the concentration ratio of mixed liquid volatile suspended solids to mixed liquor suspended solids of near-zero sludge discharge AO process will decrease after operating stably for a period of time. [**Conclusion**] This paper confirms that the near-zero sludge discharge AO process based on the combined ultrasound-alkaline technology can achieve sludge carbon source utilization and reduced sludge discharge, offering insights for waste sludge near-zero discharge and resource recovery.

Keywords sludge disintegration anoxic-oxic(AO) process near-zero sludge discharge carbon source recovery cryptic growth

《2020 年城市建设统计年鉴》数据显示,我国 2020 年干污泥产量高达 1 162 万 t,污泥处理面临巨大压力^[1]。传统的“重水轻泥”的发展模式已经无法适应当下水处理行业的发展需求,“泥水共治”才是未来正确的发展方向。

污泥破解-隐性生长是通过破解污泥释放溶解性有机物,为生化系统中的微生物繁殖提供生长基质,从而实现污泥减量的方法^[2]。通过强化污泥隐性生长的污泥原位减量技术具有污泥减量效果好、可控性强和操作简单易行等优势,工程意义显著^[3-4]。污泥破解是隐性生长的关键^[5],常见的污泥破解方式主要有氧化法、热处理法、碱处理法、超声波法等^[6]。超声波法可以通过空化效应有效地破解污泥,在实际工程中得到了广泛应用^[7]。研究^[8-9]表明,超声与碱处理联用能强化污泥破解效果,释放更多的胞内物质,这将更有利于隐性生长。Gao 等^[10]的研究对比了不同氯化工艺和超声波破解污泥减量的效果,结果表明,后者促进了更有效的污泥减量(55%)和出水化学需氧量(COD)去除(87%)。Yang 等^[11]采用配水试验的方式,利用超声-碱组合技术将 0~30%的污泥进行破解回流用于缺氧-好氧(AO)系统隐性生长和强化脱氮,研究结果证实了破解污泥可以用于补充碳源,提高 AO 系统的脱氮能力。上述研究均为将部分活性污泥进行破解,利用隐性生长降低生化工艺的污泥产率和减少每日污泥排放量,从而实现工艺系统的污泥减量。本文提出,如果直接将每日排放的剩余污泥全部进行破解处理,实现污泥趋零排放运行,不仅能够为生化工艺隐性生长和脱氮提供基质,还可以减小后续污泥外运及处置压力。然而目前相关研究相对较少,且部分试验为更好地控制进水水质条件,采用配水试验的方式进行研究,与实际废水的运行效果存在偏差。因此,研究基于实际废水的超声-碱组合技术的污泥趋零排放 AO 工艺运

行效果,对推动污泥减量和该技术的应用具有重要的参考价值。

基于此,本文以实际污水作为 AO 系统进水,将超声-碱组合工艺处理后的破解污泥回用至 AO 工艺实现污泥趋零排放,评估该工艺的出水水质和脱氮效果。同时对污泥趋零排放 AO 工艺进行了优化,对比了该工艺和传统 AO 工艺的优化策略,为超声-碱组合技术实现减量化和资源化提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

研究过程中采用 2 套 AO 反应器,如图 1 所示。2 套 AO 反应器进水流量均为 50 m³/d;缺氧池容积为 10 L,溶解氧质量浓度为 0.3~0.5 mg/L;好氧池有效容积为 25 L,溶解氧质量浓度为 2~4 mg/L;沉淀池有效容积为 2 L;混合液回流比为 200%,污泥回流比为 100%(回流污泥质量浓度为 6 000~7 000 mg/L)。在对照组中,通过试验确定排泥量为 1.5 L/d(实际由好氧池排泥),即排干泥 4.7 g/d(表 2),以维持试验组和对照组中的混合液悬浮固体(MLSS)质量浓度在 3 100 mg/L 左右,污泥龄为 16~17 d。在试验组中,将原本应排放的 1.5 L/d 的污泥全部经由超声装置(HN-1000Y,上海汗诺仪器有限公司)处理后与进水混合流入缺氧池(即整个过程不排泥)。

本试验的接种污泥取自北京市生态环境保护科学研究院中水站,原水为北京市生态环境保护科学研究院中水站进水(为生活污水和实验室废水的混合污水)。其中原水由蠕动泵提升进入缺氧池,通过自流进入好氧池,经过好氧池后通过自流进入沉淀池。试验所用污水原水的水质如表 1 所示。

1.2 试验方法

试验运行分为 3 个阶段,各阶段运行条件如表 2 所示。阶段 1 为启动阶段,通过调节排泥量来控

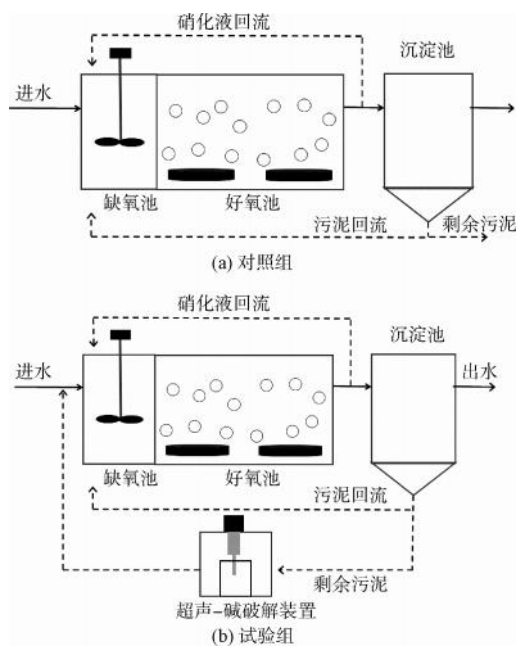


图 1 处理工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Treatment

表 1 污水原水水质

Tab. 1 Raw Wastewater Quality

指标	数值
pH 值	7.05~8.11
COD/(mg · L ⁻¹)	400~500
氨氮/(mg · L ⁻¹)	55~65
总氮(TN)/(mg · L ⁻¹)	75~85
总磷(TP)/(mg · L ⁻¹)	6~8

表 2 不同阶段的反应器运行参数

Tab. 2 Operation Parameters of Reactors under Different Stages

阶段	项目	进水类型	HRT/h	NaAc/(mg · L ⁻¹)	排放量/(L · d ⁻¹)
阶段 1(20 d)	对照组	污水	16.8	0	1.0(1~5 d)、2.0(6~10 d)、 1.5(11~20 d)
	试验组	污水	16.8	0	1(1~5 d)、2(6~10 d)、1.5 (11~20 d)
阶段 2(18 d)	对照组	污水	16.8	0	1.5
	试验组	污水+破解污泥	16.8	0	0
阶段 3(40 d)	对照组	污水	16.8	0(1~10 d)、2 000(11~13 d)、 1 800(14~16 d)、1 500(17~40 d)	1.5
	试验组	污水+破解污泥	16.8(1~8 d)、 19.2(9~40 d)	0(1~10 d)、800(11~40 d)	0

硫酸钾消解紫外分光光度法进行测定,氨氮采用纳氏试剂分光光度法进行测定,使用仪器为紫外可见

制 AO 工艺的污泥浓度。在阶段 1 中试验组不进行污泥破解处理,运行方式和对照组保持严格一致。阶段 2 开始进行对照试验,对照组运行方式和运行条件保持不变,试验组采用超声-碱组合技术破解剩余污泥,并回用于 AO 系统实现污泥趋零排放,其中超声-碱组合工艺的运行参数参考前期研究,初始 pH 值为 12,超声时间为 70 min,脉冲比为 2 : 1,声能密度为 1.6 W/mL^[12],污泥破解液平均 COD、氨氮、TN 质量浓度分别为 3 316、53.8、318.1 mg/L。同时前期研究结果显示,污泥破解完成后 pH 值为 9~10,经试验验证,污泥破解液回用未对试验系统 pH 造成影响,因此污泥破解后没有进行 pH 回调。阶段 3 在阶段 2 的基础上,通过调节水力停留时间(HRT)和外加碳源[乙酸钠(NaAc)]的方式对试验组进行参数优化,其中 HRT 调节通过增加好氧池有效容积来实现(由 25 L 增加至 30 L)。同时,为了使得对照组出水 COD 和 TN 与优化后的试验组保持同一水平,通过直接投加 NaAc 的方式提高对照组脱氮效果。反应器运行期间,通过连续监测系统出水的 COD、TN、氨氮的变化情况判断系统运行是否稳定。在阶段 2 和阶段 3 运行过程中,试验组不排泥。

1.3 分析项目和检测方法

COD 采用快速消解分光光度法进行测定,使用仪器为 COD 消解器(Thermo Scientific, COD165)和 COD 测定仪(Lovibond, ET99732);TN 采用碱性过

光分光光度计(北京普析通用仪器,T6)。MLSS 和混合液挥发性悬浮固体(MLVSS)浓度采用重量法

进行测定。

2 结果与分析

2.1 AO 系统的启动

试验组与对照组启动阶段(阶段 1)运行结果如图 2 所示。2 套反应器的进水 COD、氨氮、TN 质量浓度分别为 400~500、55~65、75~85 mg/L。在运行启动的第 3 d, AO 系统快速达到稳定状态,出水 COD、氨氮、TN 质量浓度基本保持一致,分别为 20~30、0.7~0.9、40~44 mg/L。从数据可以看出, AO

工艺稳定运行时有良好的 COD(平均去除率为 93.8%)和氨氮(平均去除率为 98.4%)去除率,但 TN 平均去除率仅为 47.8%,这可能是进水可利用碳源不足,导致缺氧池反硝化反应受到抑制。

2.2 污泥趋零排放 AO 工艺的运行效果

2.2.1 COD 去除效果

试验组与对照组在阶段 2 的进水和出水 COD 浓度如图 3(a)所示。对照组的进水 COD 质量浓度为 400~500 mg/L,出水 COD 质量浓度稳定在 22.0~29.7 mg/L,平均去除率为 94.4%。试验组对剩余污泥进行超声-碱组合技术处理,并以污泥趋零排放形式运行。由于超声-碱组合工艺破解污泥释放了大量有机物,使得试验组进水 COD 质量浓度增加至 570~650 mg/L,进水 COD 平均浓度提高 37.21%,此时出水 COD 质量浓度为 34.2~45.2 mg/L(平均去除率为 93.7%)。污泥趋零排放的运行方式对 AO 工艺的 COD 平均去除率影响不大,但导致出水 COD 升高从而会影响到达标排放。试验组出水 COD 升高,一方面可能是较高的进水 COD 浓度超出了系统的处理能力,另一方面是微生物细胞壁等细胞结构破坏后释放了少量难降解有机物,这部分物质难以通过生化处理去除,从而影响到出水水质^[13]。Zhang 等^[14]研究发现,超声破解后的污泥回流至序批式活性污泥系统,造成了出水 COD 升高,与本研究结果类似。

2.2.2 氨氮去除效果

试验组与对照组进出水氨氮浓度变化如图 3(b)所示。由于剩余污泥破解液中的氨氮浓度与进水氨氮浓度接近,污泥破解液对进水氨氮并未造成明显影响(对照组氨氮质量浓度为 55~65 mg/L,试验组氨氮质量浓度为 58~67 mg/L)。对照组和试验组出水氨氮质量浓度分别稳定在 0.8~0.9 mg/L 和 1.2 mg/L 以下,平均去除率分别为 98.7% 和 98.4%。从整体上看,基于超声-碱组合技术的 AO 工艺污泥趋零排放运行模式不会对工艺的氨氮去除造成影响。

2.2.3 TN 去除效果

如图 3(c)所示,试验组 TN 去除效果明显高于对照组, TN 平均去除率分别为 62.0% 和 49.7%。超声-碱组合技术破解污泥释放的有机物为反硝化过程提供了碳源可能是试验组 TN 去除率提高的主要原因。虽然破解污泥回流增加了进水 TN 浓度,

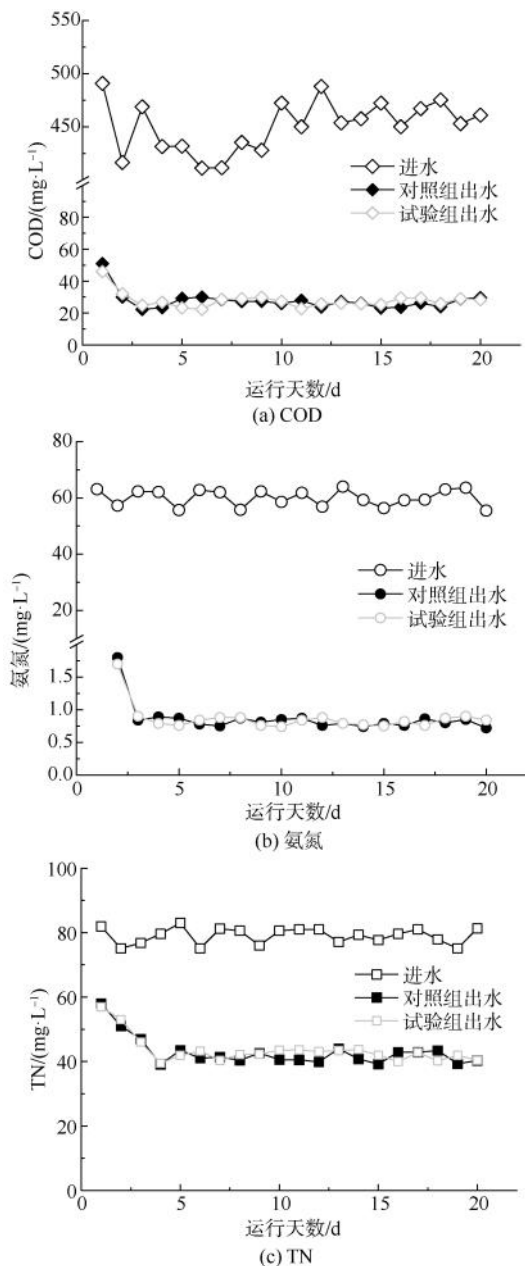


图 2 2 套反应器在阶段 1 的出水水质

Fig. 2 Effluent Quality of Two Reactors in Stage 1

但采用超声-碱组合工艺的 AO 工艺具有更强的脱氮能力和更低的出水 TN 浓度,使得 AO 工艺实现污泥趋零排放运行成为可能。

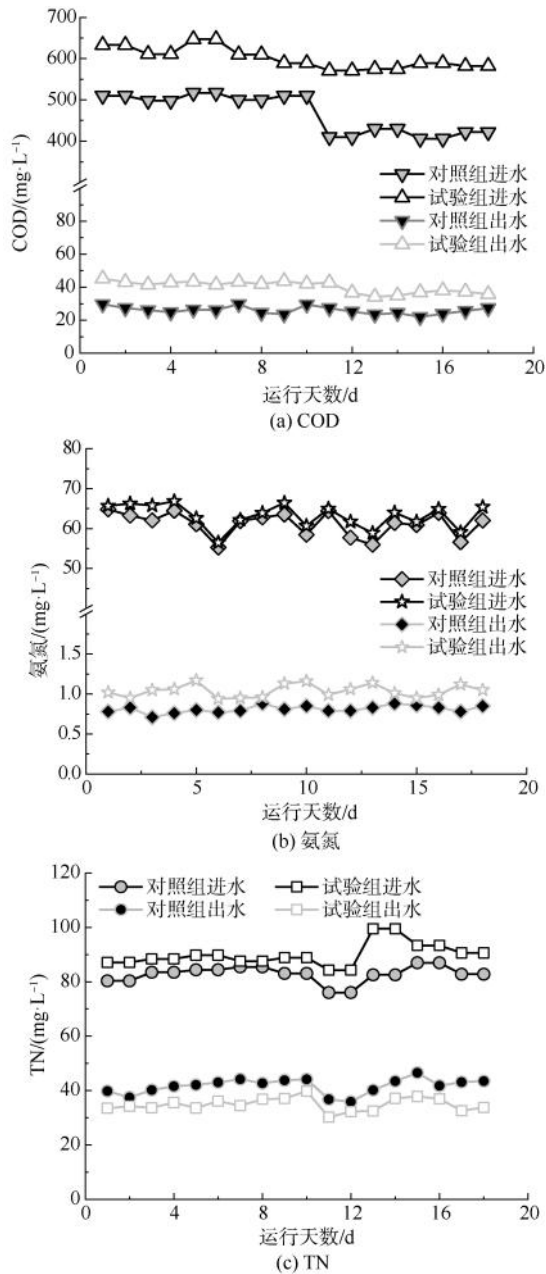


图3 2套反应器在阶段2的出水水质

Fig. 3 Effluent Quality of Two Reactors in Stage 2

2.3 污泥趋零排放 AO 工艺的运行参数优化

为了实现基于超声-碱组合工艺的 AO 工艺出水 COD 和 TN 满足北京市《水污染物综合排放标准》(DB11/ 307—2013)中 B 级排放限值(COD 质量浓度 < 30 mg/L, 氨氮质量浓度 < 1.5 mg/L, TN 质量浓度 < 15 mg/L),通过调节好氧池 HRT 和适量补

充外加碳源实现运行工艺的优化。

在阶段 3 对试验组 COD 进行连续监测,考察优化好氧池 HRT 对出水 COD 的影响[图 4(a)]。第 1~8 d,好氧池 HRT 未改变时出水 COD 质量浓度维持在 35 mg/L 左右。在第 9 d 开始增加好氧池 HRT (好氧池 HRT 由 12.0 h 延长至 14.4 h,总 HRT 由 16.8 h 延长至 19.2 h),出水 COD 质量浓度逐渐降低,最终稳定在 26~29 mg/L,出水 COD 可以满足排放标准。好氧池 HRT 的增加降低了污泥负荷,从而强化了 AO 工艺对有机物的去除能力。图 4(b)显示了外加碳源对试验组和对照组 TN 排放的影响(1~30 d 的监测结果)。试验组在第 11 d 开始投加 NaAc(投加质量浓度为 800 mg/L),出水 TN 质量浓度逐渐下降并稳定至 12 mg/L 左右,证实了在未投加 NaAc 之前缺氧池存在碳源不足的情况。

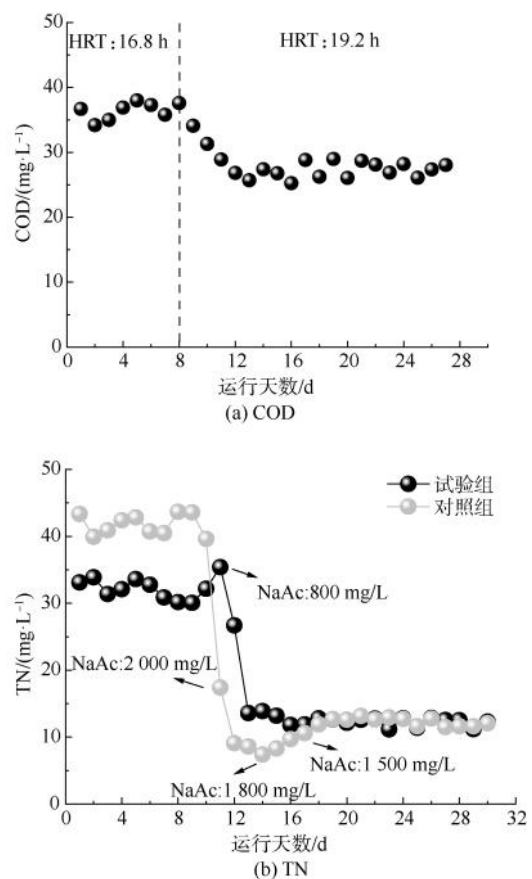


图4 2套反应器在参数优化后的处理出水水质

Fig. 4 Effluent Quality of Two Reactors after Parameters Optimization

由于对照组不存在出水 COD 浓度升高的情况,因此仅采用投加碳源的方式对对照组的脱氮效果进

行优化。在 1~10 d 未投加 NaAc 时,对照组出水 TN 质量浓度为 40 mg/L 左右。第 11 d 开始向对照组中逐级投加 NaAc,投加质量浓度分别为 2 000 (11~13 d) mg/L、1 800 (14~16 d) mg/L、1 500 mg/L(17 d 以后),17 d 以后出水 TN 质量浓度稳定在 12 mg/L 左右,低于规定的排放限值。

根据上述研究结果,直接利用投加碳源的方式强化传统 AO 工艺的脱氮效果,需要消耗大量的外加碳源。通过适当延长好氧池 HRT 和补充适量外加碳源可以优化污泥趋零排放运行模式下 AO 工艺的处理效果,弥补污泥破解液回流引起的出水 COD 浓度增加,并进一步提高工艺脱氮能力,使得出水水质满足严格的北京市地方排放标准。与传统的 AO 工艺+投加碳源的运行策略相比,采用超声-碱组合技术+延长 HRT+投加碳源的运行策略可以保证 AO 工艺以污泥趋零排放模式运行,还可以节约外加碳源的使用量。根据装置处理量进行计算,对照组每日 NaAc 投加质量为 75 g;试验组每日 NaAc 投加质量为 40 g,因此污泥破解液回流补充部分碳源后,试验组每日 NaAc 投加质量可减少 35 g (约为 46.7%)。进一步进行吨水成本核算,NaAc 吨水节约量为 700 g,NaAc 市场价约为 4 000 元/t,则外加碳源节约的经济效益吨水为 2.8 元。

2.4 污泥趋零排放 AO 工艺的污泥浓度变化

MLVSS 与 MLSS 浓度比 (C_{MLVSS}/C_{MLSS}) 可以间接反映生化系统中的污泥活性^[15],通过 78 d 的连续运行(其中 21~58 d 为污泥趋零排放阶段)来考察生化系统的 C_{MLVSS}/C_{MLSS} 的变化情况,评价剩余污泥趋零排放对污泥活性的影响。由图 5(a)可知,整个运行过程中对照组 C_{MLVSS}/C_{MLSS} 值稳定在 0.74~0.78。试验组在破解污泥回用后, C_{MLVSS}/C_{MLSS} 逐渐由 0.77 左右降至 0.70 左右,间接表明污泥活性降低,但在运行期间仍基本维持在传统活性污泥法的典型值内(0.70~0.80)^[10]。试验组 C_{MLVSS}/C_{MLSS} 值持续降低的原因可能是破解污泥回用后,系统中无机物累积^[16]。图 5(b)显示了试验过程中 AO 系统的 MLSS 与 MLVSS 的浓度变化情况。在 1~20 d 内 MLSS 和 MLVSS 浓度先升高后降低,这是调节排泥量造成的(表 2)。与对照组相比,试验组 MLVSS 随着运行时间增加出现明显降低,可能是污泥破解造成污泥有机组分减少及胞内物质释放引起碳氮比的

较大波动[图 5(b)]。上述结果表明,超声-碱组合技术不仅能够为反硝化提供碳源强化生化系统的脱氮效能,还可以实现污泥的趋零排放,减少污泥排量,从而实现污泥的资源化和减量化。

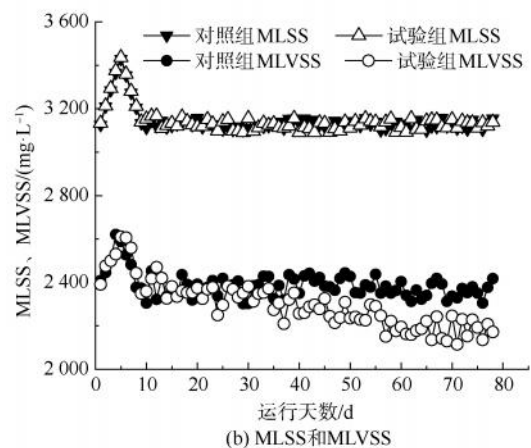
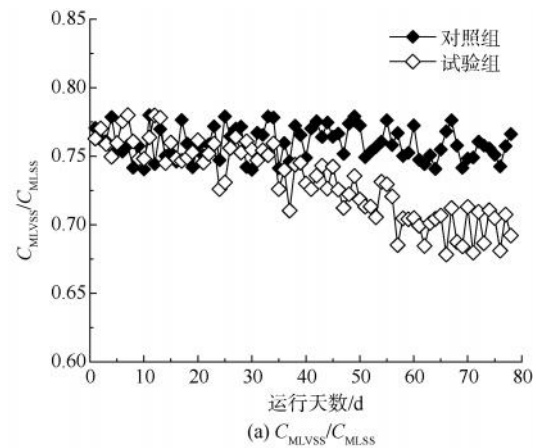


图 5 2 套反应器中 MLSS、MLVSS 和 C_{MLVSS}/C_{MLSS} 随时间的变化

Fig. 5 Changes of MLSS, MLVSS and C_{MLVSS}/C_{MLSS} in Two Reactors with Time

3 结论

通过连续运行基于超声-碱组合技术破解污泥回用的污泥趋零排放 AO 工艺小试试验,评价了该运行模式下 COD、氨氮和 TN 的去除效果,并对工艺进行优化,得到以下结论。

(1) 超声-碱组合技术处理后的破解污泥回用于 AO 工艺会导致出水 COD 升高,对氨氮去除效果和出水浓度影响较小。对 TN 而言,破解污泥回用可补充碳源,明显改善 AO 工艺对 TN 的去除效果, TN 平均去除率由 49.7% 提升至 62.0%。

(2) 通过调节污泥趋零排放 AO 工艺的好氧池

HRT 可以明显地改善超声-碱组合技术破解污泥后造成的出水 COD 升高的问题,同时投加适量的外加碳源可以提高工艺的脱氮能力,使得出水水质满足北京市《水污染物综合排放标准》(DB11/307—2013)中 B 级排放要求。此外,与采用直接投加碳源强化常规 AO 工艺脱氮效果的优化策略相比,破解污泥回用+延长 HRT+投加部分碳源的运行方式可以节约 46.7%的外加碳源。

(3)通过超声-碱组合技术实现污泥趋零排放的运行方式可能会造成污泥中无机物积累,使污泥活性降低,需要进一步关注。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2020 年城市建设统计年鉴[EB/OL]. (2021-10-12)[2024-11-21]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/index.html>. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2020 China urban construction statistical yearbook[EB/OL]. (2021-10-12)[2024-11-21]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/index.html>.
- [2] 徐学信,王永磊,刘永剑,等. 溶胞预处理强化污泥减量技术研究进展[J]. 净水技术, 2019, 38(3): 38-44. Xu X X, Wang Y L, Liu Y J, et al. Research advances in enhanced sludge reduction technology by cell lysis pretreatment [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(3): 38-44.
- [3] 刘文韬. 采用电极溶胞-隐性生长的原位污泥减量效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. Liu W T. Study on in-situ sludge reduction efficiency using electrode lysis-cryptic growth[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [4] 魏源送,林佳琪,徐宇峰,等. 基于微生物新陈代谢过程的污泥原位减量技术进展[J]. 环境工程学报, 2020, 14(9): 2291-2309. Wei Y S, Lin J Q, Xu Y F, et al. State of the art of *in-situ* sludge reduction technology based on microbial metabolic process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(9): 2291-2309.
- [5] 蒲欣,张波,许小红,等. 涡流空化协同臭氧氧化污泥减量实验研究[J]. 水处理技术, 2021, 47(6): 126-129, 136. Pu X, Zhang B, Xu X H, et al. Experimental study on sludge reduction by vortex cavitation combined with ozone oxidation[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(6): 126-129, 136.
- [6] 窦川川,刘玉玲,赵鹏鹤,等. 碱预处理对剩余污泥 DOM 的溶出特征及平行因子分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(19): 14-21. Dou C C, Liu Y L, Zhao P H, et al. Effect of alkaline pretreatment on DOM dissolution characteristics of excess sludge and parallel factor analysis [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(19): 14-21.
- [7] Wang Q L, Wei W, Gong Y Y, et al. Technologies for reducing sludge production in wastewater treatment plants: State of the art [J]. Science of the Total Environment, 2017, 587: 510-521. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.203.
- [8] 张婧伟,白周央,杨树成. 超声-碱预处理以促进污泥水解效率的研究进展[J]. 工业水处理, 2020, 40(4): 12-17. Zhang J W, Bai Z Y, Yang S C. Research progress on the improvement of hydrolysis efficiency by ultrasonic-alkali pretreatment of sludge [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(4): 12-17.
- [9] Tian X B, Ng W J, Trzcinski A P. Optimizing the synergistic effect of sodium hydroxide/ultrasound pre-treatment of sludge [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 48: 432-440. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.07.005.
- [10] Gao J L, Liu Y, Yan Y X, et al. Promotion of sludge process reduction using low-intensity ultrasonic treatment [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 325: 129289. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129289.
- [11] Yang S S, Yu X L, Ding M Q, et al. Simulating a combined lysis-cryptic and biological nitrogen removal system treating domestic wastewater at low C/N ratios using artificial neural network [J]. Water Research, 2021, 189: 116576. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116576.
- [12] 陈玉朋,孙光溪,徐文江,等. 超声-碱组合工艺对污泥释放有机物及氮磷的影响[J]. 水处理技术, 2023, 49(4): 110-114. Chen Y P, Sun G X, Xu W J, et al. Effect of combined ultrasonic-alkaline process on organics, nitrogen and phosphorus release from sludge [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(4): 110-114.
- [13] Li A M, Li Y Z, Huang K W, et al. Sustainable use of rice husk powder and bamboo powder as sludge deep dewatering conditioners in pilot-scale application: Feasibility for incineration and potential application for land use [J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, 32: 103411. DOI: 10.1016/j.eti.2023.103411.
- [14] Zhang J, Dong Y L, Wang Q W, et al. Effects of ultrasonic lysis frequency on sludge lysis-cryptic growth: Sludge reduction, microbial community, and metabolism [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 469: 144000. DOI: 10.1016/j.cej.2023.144000.
- [15] Zhang Y, Meng C C, He Y L, et al. Influence of cell lysis by Fenton oxidation on cryptic growth in sequencing batch reactor (SBR): Implication of reducing sludge source discharge [J]. Science of the Total Environment, 2021, 789: 148042. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148042.
- [16] Amin M M, Taheri E, Ghasemian M, et al. Proposal of upgrading Isfahan north wastewater treatment plant: An adsorption/bio-oxidation process with emphasis on excess sludge reduction and nutrient removal [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 255: 120247. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120247.